

Actualización del método experimental para medir el tiempo de reverberación en recintos

César Eduardo Boschi ¹; Carlos Adrián Prado¹; Eduardo Ariel Abarca¹

Resumen: El objetivo del presente estudio es exponer un método experimental adaptado para medir el Tiempo de Reverberación (TR60) y corroborar su correspondencia con dos modelos que fueron desarrollados para predecir dicho Tiempo de Reverberación en recintos cerrados. Si una sala tiene paredes altamente reflectantes del sonido, la inteligibilidad disminuye porque los sonidos que se van emitiendo, se confunden con los anteriores que aún no se han extinguido. Lo contrario sucede si las paredes son muy absorbentes, en cuyo caso se observa una sensación de molestia causada por el hecho de que los sonidos se extinguen inmediatamente después de ser emitidos y se percibe un estado de sofocación que dista mucho de ser agradable. Dependiendo del uso que se le dé a una determinada sala será el Tiempo de Reverberación que se recomienda como correcto para la misma. Desde el punto de vista del diseño de recintos destinados a la audición, el control de la reverberación de los sonidos constituye una premisa fundamental, en consecuencia, es necesario poder medir este parámetro de manera precisa. Se expone como ha sido la evolución del método experimental adaptado hasta la actualidad en donde se ha incorporado el uso de herramientas informáticas. Luego, se discuten tres casos en los que se aplicó y finalmente se analiza su utilidad para emplearlo en tareas de acondicionamiento acústico de recintos fundamentalmente en lo que hace a sus ventajas, exactitud y practicidad.

Palabras claves: acústica, arquitectura, sonido, reverberación, inteligibilidad

¹ Laboratorio de Acústica y Sonido "Mario Guillermo Camín"
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza.

Introducción:

Cuando una fuente sonora vibra produce ondas que se propagan en el aire a una velocidad aproximada de 340 m/s. Cuando estas ondas se encuentran con un obstáculo una parte es absorbida por él, otra es transmitida a través de este y otra parte es reflejada. La proporción entre ellas depende de la naturaleza del material. En un recinto cerrado la vibración del aire contenido por aquel se debe a la acción resultante de la onda progresiva y las ondas regresivas originadas en las múltiples reflexiones en las superficies límites. Las reflexiones se van produciendo entre paredes, techo, suelo y así sucesivamente, de manera que se superponen al sonido original. Si las reflexiones son en gran número y se suceden erráticamente en el tiempo, el campo sonoro resultante se llama reverberante o difuso. A los fines de poder cuantificar este fenómeno se ha definido un parámetro que se denomina el tiempo de reverberación (TR60), y se define como el tiempo necesario para que el nivel de una señal acústica, cuya emisión se interrumpe, caiga 60 dB con respecto al nivel primitivo. Desde el punto de vista del diseño de recintos destinados a la audición, el control de la reverberación de los sonidos constituye una premisa fundamental. Si una sala tiene paredes altamente reflectantes del sonido, la inteligibilidad disminuye porque los sonidos que se van emitiendo, se confunden con los anteriores que aún no se han extinguido. Lo contrario sucede si las paredes son muy absorbentes, en cuyo caso se observa una sensación de molestia causada por el hecho de que los sonidos “mueren” inmediatamente después de ser emitidos y se percibe un estado de sofocación que dista mucho de ser agradable. Dependiendo del uso que se le dé a una determinada sala será el tiempo de reverberación que se considere como correcto para la misma.

Materiales y Métodos:

En principio el tiempo de reverberación es función del volumen de la sala y del coeficiente de absorción de las superficies de ésta. Distintas fórmulas se han desarrollado para predecir dicho tiempo teniendo en cuenta estas características:

Fórmula de Sabine

Esta fórmula fue postulada por Sabine partiendo del supuesto de que existe un reparto homogéneo de absorbentes con un coeficiente de absorción bajo (Recuero, 2000). Teniendo en cuenta estos supuestos el tiempo de reverberación puede calcularse mediante la fórmula:

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{A} \quad (1)$$

En donde:

T : Tiempo de reverberación [s]

V : Volumen de la sala [m³]

A : Absorción total [m²]

Obtenida a partir de:

$$A = \alpha \cdot S \quad (2)$$

Siendo:

α : Coeficiente de absorción sonora

S : Área de la superficie de la sala [m²]

Fórmula de Norris - Eyring

Esta fórmula sólo es aplicable cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos para todas las superficies límite (Davis y Davis, 1987).

$$T = 0,161 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \quad (3)$$

Donde:

α_m : Coeficiente de absorción medio

Fórmula de Millington - Sette

Si los coeficientes de absorción que entran en juego difieren grandemente unos de otros, es conveniente utilizar la siguiente fórmula de Millington - Sette:

$$T = 0,161 \frac{V}{-\sum S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (4)$$

Donde:

S_i : Área del material i ésimo [m²]

α_i : Coeficiente de absorción de dicho material

En todos los casos no se ha tenido en cuenta el factor de absorción del aire, el cual solo resulta significativo para las cortas longitudes de onda, sobre todo en salas de gran volumen, mayor a 5000 m³.

Procedimiento para medir el Tiempo de Reverberación

Existen diversos métodos para medir el tiempo de reverberación, las diferencias fundamentales en los distintos métodos están basadas en la información que se desee obtener, es decir, si se trata de obtener valores globales de discernimiento de una banda de frecuencias en un espectro amplio o se busca mayor resolución en determinadas frecuencias (Mompín Poblet, 1982). El método de medición adaptado inicialmente empleaba un detonador y un sonómetro con registrador. Se empleaba preferentemente una detonación como fuente de sonido porque se obtienen niveles sonoros altos y con un espectro de frecuencias generalmente muy amplio. La actualización implementada consiste en emplear en vez de una detonación como fuente sonora, ruido blanco generado electrónicamente, emitido a través de una fuente omnidireccional ubicada en la sala bajo estudio y un sonómetro con datalogger también ubicado en el lugar bajo estudio, lo suficientemente alejado de la fuente sonora como para estar en el campo reverberante.

Resumidamente el procedimiento es el siguiente:

1. Se coloca el Medidor de Nivel Sonoro en un trípode.
2. Se enciende el Medidor de Nivel Sonoro.
3. Se fija la toma de muestra en una cada 0,1 segundo.
4. Se selecciona el tiempo de respuesta del Medidor de Nivel Sonoro en respuesta rápida (Fast).
5. Se selecciona el filtro de ponderación "A".
6. Se selecciona el mayor rango del instrumento.
7. Se genera ruido blanco con un nivel idealmente de 70 dB o en su defecto de 40 dB por encima del ruido de fondo y se espera a que se estabilice el nivel sonoro que detecta el registrador.
8. Se interrumpe abruptamente la emisión del sonido.
9. Pasado un lapso suficiente hasta que se extingue todo el sonido generado por la fuente, se detiene la toma de registros.
10. Se descargan los datos del instrumento medidor a una computadora y se procesan.
11. Opcionalmente se puede repetir todo el proceso desde el punto 5 seleccionando el filtro de ponderación del instrumento registrador en la posición "C".

Los registros almacenados en el instrumento medidor tienen el siguiente aspecto, de los cuales, mediante procesamiento se puede obtener el tiempo buscado.

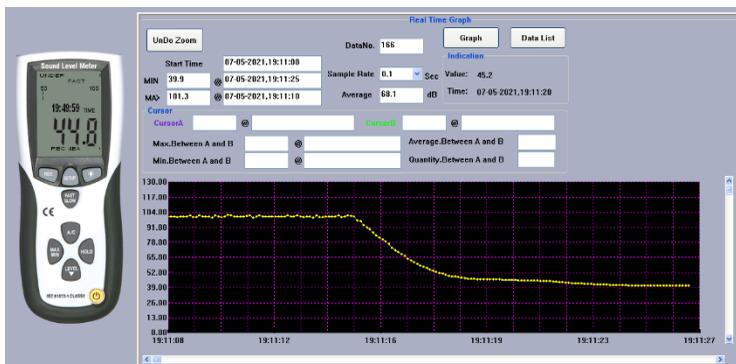


Figura Nº 1. Instrumento medidor con registros almacenados

Si el salto de niveles sonoros es de 70 dB por encima del ruido de fondo, es posible medir directamente el Tiempo de Reverberación (TR60), como esto no siempre es posible se puede determinar el tiempo que tarda en decaer el nivel sonoro 30 dB (TR30) y luego se extrapolar dicho valor para hallar el TR60.

Resultados:

En particular se analizan a continuación tres casos distintos que fueron ensayados por este método, los cuales se han seleccionado ya que sus volúmenes difieren notablemente entre sí.

Caso Nº 1: Sala de ensayo de bandas musicales

Al momento de realizarse las mediciones, la sala bajo estudio se encontraba en sus superficies con los siguientes revestimientos:

Cerramiento	Tipo de revestimiento	Sup., [m ²]
Norte	Enlucido de yeso o cal con terminación fina y pintado	11,50
Sur	Enlucido de yeso o cal con terminación fina y pintado	8,30
	Bafle fonoabsorbente	3,20
Este	Enlucido de yeso o cal con terminación fina y pintado	10,37
	Bafle fonoabsorbente	3,20
Oeste	Enlucido de yeso o cal con terminación fina y pintado	13,57

Techo	Yeso sobre metal desplegado	29,50
Piso	Entarimado de madera	25,50
	Alfombra de lana 1,2 kg/m2	4
Objetos	Personas de pie (0,8 m2/persona)	4
	Batería, bafle y mesa	4

Tabla N° 1. Distribución de revestimientos para el caso N° 1

Tal situación se puede observar en la siguiente figura:



Figura N° 2. Aspecto de la sala de ensayos al momento de realizar las mediciones

Luego de aplicar el procedimiento descrito y de procesar los datos, el tiempo de reverberación medido para la sala bajo estudio fue de 1,6 segundos usando ambos filtros "A" y "C".

En la siguiente tabla se comparan los valores calculados con las fórmulas de Sabine, Norris – Eyring y Millington – Sette expuestas bajo el título Materiales y Métodos.

Caso N° 1, Volumen, [m ³] = 67,85							
Frecuencia, [Hz]	128	256	512	1024	2048	4096	Prom.
TR60, [s] Sabine	1,83	1,48	1,40	0,99	0,84	1,05	1,27

TR60, [s] Norris	2,15	1,59	1,30	0,63	0,91	1,14	1,29
TR60, [s] Millington	1,73	2,09	1,75	1,21	0,82	1,11	1,45

Tabla N° 2. Valores calculados para el caso N° 1.

Caso N° 2: Templo Evangélico “Dios de Israel”

Al momento de realizarse las mediciones, la sala bajo estudio se encontraba en sus superficies con los siguientes revestimientos:

Cerramiento	Tipo de revestimiento	Sup., [m ²]
Norte	Placa de yeso 12 mm de espesor con un espacio de aire de 7 cm atrás	40,25
Sur	Enlucido Yeso o cal, terminación gruesa	37,25
	Vidrio, cristal corriente de ventana	3,00
Este	Enlucido Yeso o cal, terminación gruesa	57,74
	Vidrio, cristal corriente de ventana	1,76
Oeste	Enlucido de yeso o cal con terminación gruesa, pintado	51,51
	Vidrio, cristal corriente de ventana	4,50
	Puerta de madera	3,49
Techo	Yeso con cámara de aire	195,50
Piso	Cerámico	195,50
Objetos	Personas de pie (0,8 m ² /persona)	8
	Asiento (0,8 m ² /asiento)	180

Tabla N° 3. Distribución de revestimientos para el caso N° 2.

Tal situación se puede observar en la siguiente figura:



Figura N° 3. Aspecto de la sala bajo estudio del Caso N° 2 al momento de realizar las mediciones

El tiempo de reverberación medido para la sala bajo estudio fue de 2,6 segundos usando el filtro "A" y 2,8 segundos usando el filtro "C".

En la siguiente tabla se comparan los valores calculados.

Caso N° 2, Volumen, [m ³] = 664,24							
Frecuencia, [Hz]	128	256	512	1024	2048	4096	Prom.
TR60, [s] Sabine	2,7	3,2	4,1	3,9	3,1	2,8	3,3
TR60, [s] Norris	1,5	1,6	2,1	2,3	1,7	1,8	1,8
TR60, [s] Millington	2,5	3,5	4,5	4,5	3,3	3,0	3,6

Tabla N° 4. Comparación de resultados para el caso N° 2.

Caso N° 3: Templo Evangélico "Jesús Luz del Mundo"

Al momento de realizarse las mediciones, la sala bajo estudio se encontraba en sus superficies con los siguientes revestimientos:

Cerramiento	Tipo de revestimiento	Sup., [m ²]
Norte	Enlucido de yeso o cal con terminación fina, pintada	386,76
	Vidrio, cristal corriente de ventana	9,96

Sur	Enlucido Yeso o cal, terminación fina, pintada	386,76
	Vidrio, cristal corriente de ventana	9,96
Este	Moqueta pegada sobre cemento	65,52
	Puerta de vidrio	18,00
Oeste	Enlucido de yeso o cal con terminación fina, pintado	83,52
Techo	Placas de cielorraso suspendido con espacio de aire arriba	321,14
Piso	Cerámico	264,50
	Moqueta sobre suelo de cemento	56,64
Objetos	Personas de pie (0,8 m ² /persona)	14
	Asiento (0,8 m ² /asiento)	500

Tabla N° 5. Distribución de revestimientos para el caso N° 2.

Tal situación se puede observar en la siguiente figura:



Figura N° 4. Aspecto de la sala bajo estudio del Caso N° 3 al momento de realizar las mediciones

El tiempo de reverberación medido para la sala bajo estudio fue de 2,4 segundos para las mediciones con ambos filtros "A" y "C".

En la siguiente tabla se comparan los valores calculados.

Caso N° 3, Volumen, [m ³] = 2516,08							
Frecuencia, [Hz]	128	256	512	1024	2048	4096	Prom.
TR60, [s] Sabine	3,14	2,99	2,63	2,29	2,13	1,97	2,52
TR60, [s] Norris	2,35	2,17	1,59	1,39	1,26	1,19	1,66
TR60, [s] Millington	2,25	2,26	2,18	1,80	1,54	1,43	1,91

Tabla N° 6. Comparación de resultados para el caso N° 3.

Discusión:

Los tres casos analizados difieren notablemente en el volumen de las salas, además dos ellos tenían un tratamiento acústico previo, esto determina cuales son las fórmulas que simulan con mejor aproximación los resultados medidos del tiempo de reverberación. Las fórmulas de Sabine y la de Norris – Eyring, son de aplicación cuando los coeficientes de absorción son parecidos y de valores inferiores a 0,2. En cambio, la fórmula de Millington – Sette es conveniente utilizarla si los coeficientes de absorción que entran en juego difieren grandemente unos de otros.

Por otro lado, por la naturaleza de la respuesta de los filtros de ponderación del instrumento medidor, si se utiliza el filtro “A” introduce una fuerte atenuación en bajas y en altas frecuencias por lo que permite medir la respuesta de la sala en frecuencias medias, típicamente en torno a los 1000 Hz. En cambio, si se utiliza el filtro de ponderación “C”, la banda pasante del mismo prácticamente no atenúa sonidos de ninguna de las frecuencias analizadas (Recuero, 1999).

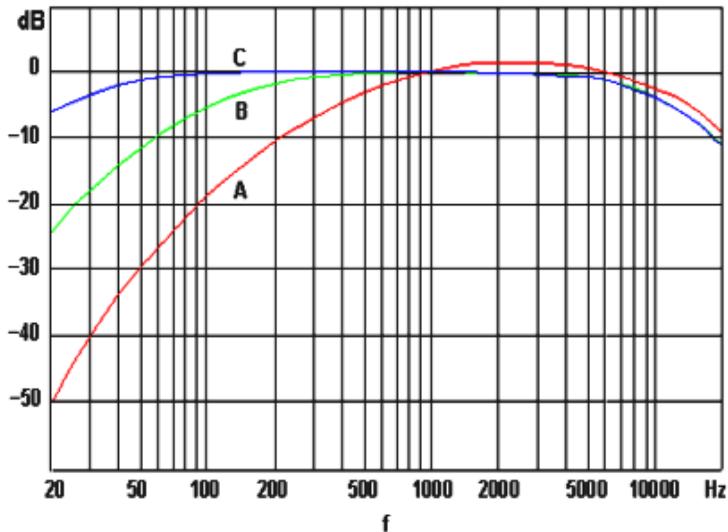


Figura N° 5. Curvas de los filtros de ponderación

En el Caso N° 1 bajo estudio, correspondiente a una sala de ensayos de bandas musicales la comparación entre los valores medidos y los calculados arrojó los siguientes valores

Caso N° 1			
	Medido	Calculado	error %
TR60 -Filtro A	1,6	1,21	24%
TR60 -Filtro C	1,6	1,45	9%

Tabla N° 7. Comparación de valores medidos y calculados para el Caso N° 1.

Se observa una buena correlación entre los valores medidos y los calculados con la fórmula de Millington – Sette dado que los coeficientes de absorción de los materiales de revestimiento de la sala difieren notablemente unos de otros. Los errores obtenidos con las otras dos fórmulas son mayores.

En el Caso N° 2 bajo estudio, correspondiente al templo “Dios de Israel”, la comparación entre los valores medidos y los calculados arrojó los siguientes valores

Caso N° 2			
	Medido	Calculado	error %
TR60 -Filtro A	2,6	2,3	12%
TR60 -Filtro C	2,8	1,8	36%

Tabla N° 8. Comparación de valores medidos y calculados para el Caso N° 2.

Se observa una buena correlación entre los valores medidos utilizando el filtro "A" y los calculados con la fórmula de Norris – Eyring. Esto es coherente con el hecho que los coeficientes de absorción de los materiales de revestimiento de la sala son similares unos de otros. Los errores obtenidos con las otras dos fórmulas son mayores.

En el Caso N° 3 bajo estudio, correspondiente al templo "Jesús Luz del Mundo", la comparación entre los valores medidos y los calculados arrojó los siguientes valores

Caso N° 3			
	Medido	Calculado	error %
TR60 -Filtro A	2,4	2,29	5%
TR60 -Filtro C	2,4	2,52	5%

Tabla N° 9. Comparación de valores medidos y calculados para el Caso N° 3.

Se observa una buena correlación entre los valores medidos utilizando ambos filtros y los calculados con la fórmula de Sabine. Esto es coherente con el hecho que los coeficientes de absorción de los materiales de revestimiento de la sala son similares unos de otros. Los errores obtenidos con las otras dos fórmulas son mayores.

Conclusiones:

El método de medición empleado permite obtener resultados rápidos y con un buen grado de aproximación. Tiene la ventaja de ser un método sencillo de implementar. La desventaja radica en el hecho de que no aporta información discriminada sobre las distintas bandas de octava. Por lo tanto, este método es útil en una etapa inicial de acondicionamiento acústico de una sala.

Agradecimientos:

Se agradece colaboración del Ing. Adrián Muñoz para gestionar los permisos ante los responsables de las salas bajo estudio y su ayuda durante las mediciones. Asimismo, se agradece la colaboración de los mencionados responsables: Sres. Álvaro Martínez, Daniel Díaz y Alejandro Morelato respectivamente.

Referencias:

Recuero López, M. (1999). *Acústica Arquitectónica*. Madrid: Paraninfo.

Recuero López, M. (2000). *Ingeniería Acústica*. Madrid: Paraninfo.

Davis, D. y Davis, C. (1987). *Sound System Engineering*. Indianápolis: Sams.

Mompín Poblet, J. et al. (1982). *Manual de Alta Fidelidad y Sonido Profesional*. Barcelona: Marcombo Boixareu.

* * *